1990—2023年新疆地表水体面积动态变化及其驱动因素

邹 彬[1,2]， 邹 珊[2,3,4]， 杨余辉[1]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；2. 中国科学院新疆生态与地理研究所，荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 中国科学院大学，北京 10049；4. 阿克苏绿洲农田生态系统国家野外科学观测研究站，新疆 阿克苏 843017）

摘 要： 新疆拥有独特的山地-绿洲-荒漠生态系统，其中地表水体是维持生态平衡和支持区域经济社会发展的核心要素。本研究利用Landsat 5/7/8/9卫星遥感影像，运用混合指数算法对1990—2023年新疆地表水体面积进行计算，并分析其空间格局及变化特征。同时，采用地理探测器方法揭示了影响地表水体面积变化的因素。结果表明：1990—2023年新疆永久性水体面积增加了36.25%（2466.20 km^2），主要由山地水体主导，特别是羌塘高原内陆河流域显著扩张，增加约三分之二（1149.58 km^2）；季节性水体面积则增长了181.90%（1924.84 km^2），以绿洲-荒漠水体为主，其中塔里木河干流尤为突出，面积增加约两倍（344.92 km^2）。山地水体的变化主要受到气候因素的影响，其中雪水当量的平均贡献率最高，达到42.84%；而人类活动对绿洲-荒漠水体的影响则较大，人口密度和耕地的平均贡献率分别为64.10%和54.43%。本研究全面分析了新疆地表水体的时空变化特征及其驱动因素，为科学评估新疆水资源开发潜力及制定合理的水资源管理策略提供了一定的科学依据。

关键词： 地表水体；Landsat；山地-绿洲-荒漠；气候变化；新疆

在过去几十年里，全球范围的气候变化和人类活动对地表水资源产生了深远的影响[1]。地表水资源主要包括天然的湖泊、池塘、江河以及人工挖掘的水库、河道、沟渠等，其在农业生产、生态系统稳定和功能维持等方面发挥着重要作用[2-3]。新疆地区属于典型的干旱区，水资源短缺是制约其经济发展的重要因素之一，其水资源主要来源于山区降水和冰川融水补给，对气候变化十分敏感[4]，近年来的变暖趋势不仅影响降水的形式（如雨雪），而且还加速了雪和冰川消融过程，从而促进了地表水资源的变化[5]。随着人口增长和社会经济发展，人类活动对水资源的需求进一步提升，使得地表水资源的压力愈发显著[6]。已有研究表明，近30 a来，气候变化影响下昆仑山北坡地表水体面积扩大了71.03%[7]；在人口、灌溉面积及生产值持续增长的艾比湖流域，近20 a来面积剧烈波动[8]；塔里木河下游实施的生态输水工程使得台特玛湖湖区水体面积扩张了10.92倍[9]。因此，了解地表水体（SWA）的时空变化对当地的生态环境和社会经济发展十分重要，对新疆地区地表水资源的时空变化特征及影响因素进行深入研究，具有重要的理论和实践意义。

遥感技术能够在多个尺度上连续监测地球表面，获得更加丰富的信息[10]，随着近年来Google Earth Engine（GEE）地理计算云平台技术的快速发展，基于长时序海量中高分辨率遥感数据（Landsat、Sentinel等）的全球或洲际大范围区域地表覆盖制图能力获得跨越式提高[11-12]，使对地表水动态变化的时空监测得到了广泛的发展[13]。目前，相关研究主要采用了三种水体提取方法：（1）阈值法，通过选择合适的波段增强水体特征信息，设定阈值进行图像分割，完成水体提取。如Mcfeeters[14]提出归一化差分水体指数（NDWI）和Xu[15]随后提出修正的归一化差异

收稿日期： 2024-10-06； **修订日期：** 2024-11-08
基金项目： 第三次新疆综合科学考察项目（2023xjkk0101）
作者简介： 邹彬（2000-），男，硕士研究生，主要从事干旱区水文过程研究. E-mail: zoubin0304@163.com
通讯作者： 邹珊. E-mail: zoushan@ms.xjb.ac.cn

水体指数(mNDWI),由于其计算简单,易于实现,被广泛使用,但水体和非水体的最优阈值却难以确定。(2) 分类器方法,可分为基于光谱特征的分类器法,如最大似然分类法、马氏距离分类法等[16],以及基于特征融合的分类器法,如人工神经网络(ANN)、支持向量机(SVM)、随机森林(RF)算法等[17-18],这类方法能够有效提高分类精度,但这类算法计算过程耗时,提取精度受训练样本和算法参数的影响较大。(3) 使用基于大数据分析和信息提取的特殊水体分类方法,如深度学习和基于经验优化的技术[1],这类方法具有较高的精度和性能,但操作复杂。

本文基于GEE平台,对1990—2023年新疆地区地表水体的空间格局与变化趋势进行分析,揭示了气候变化和人类活动对水体面积变化的影响,以期为新疆地区水资源管理与优化配置、生态保护政策制定以及促进新疆地区高质量发展提供科学依据。

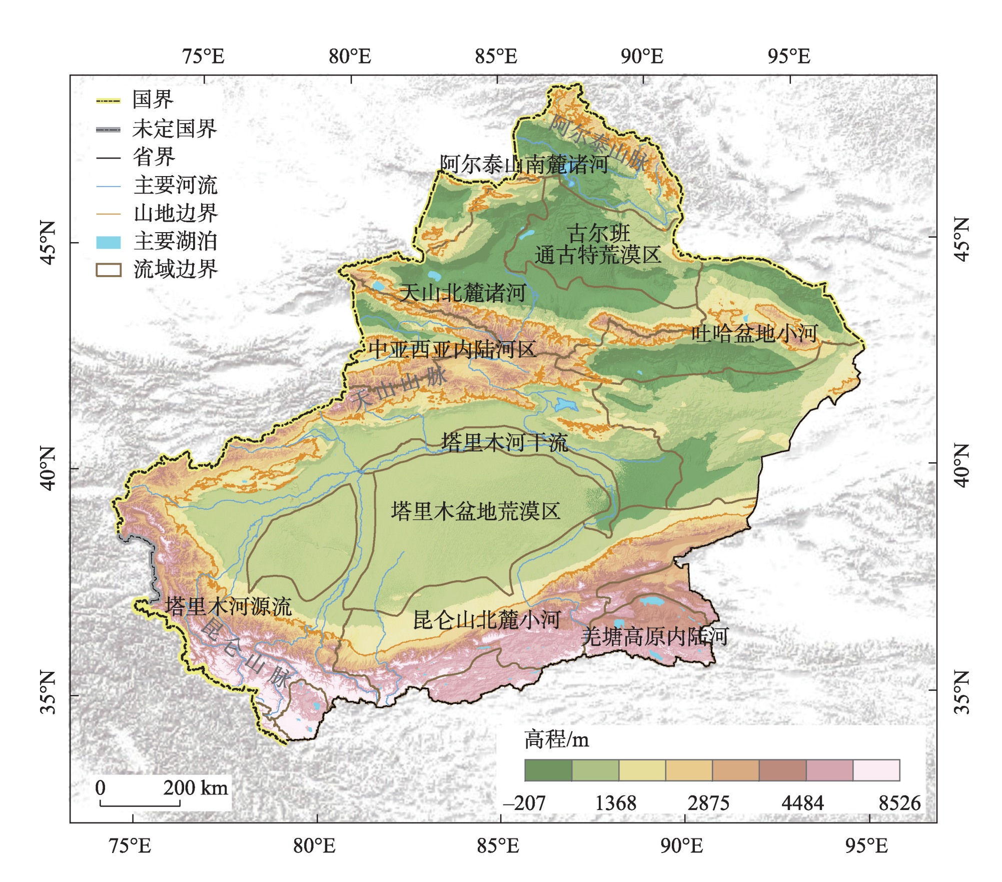
1　数据与方法

1.1　研究区概况

新疆位于中国西北部,地处34°25′~49°10′N,73°40′~96°23′E,总面积约为166.49×10⁴ km²,是中国面积最大的省级行政单位。新疆位于亚欧大陆腹地,远离海洋,地形自西南向东北递减,境内阿尔泰山山脉、天山山脉和昆仑山山脉横穿整个区域,阻碍了来自太平洋和印度洋的水汽,使得新疆的年平均降雨量仅有150 mm左右。冰川积雪融水和山地降水是整个地区水资源的重要来源,河流发源于山地,穿过人类社会活动频繁的绿洲,同时也是新疆重要的农业和灌溉区,然后消失在荒漠中,最终形成新疆独特的山地-绿洲-荒漠生态系统。新疆水资源分布具有显著的时空多样性,对气候变化高度敏感[19]。本研究基于中国1:250000二级流域分级数据集,将新疆划分为10个子流域(图1),探讨不同流域地表水体的变化特征。

1.2　数据来源

1.2.1　影像数据　基于GEE平台选取了104033张研究区内1990—2023年Landsat影像。影像的质量和数量受采集时间和天气条件的影响,通过GEE将云量阈值设置为<20%来过滤图像以保持质量,得到可用的影像,共56007张影像,其中Landsat 5影像



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2021)5443号,对底图边界无修改。下同。

图1　研究区概况

Fig. 1　Map of study area

14182幅，Landsat 7影像25632幅，Landsat 8影像13379幅，Landsat 9影像2814幅(图2a)。对每幅影像进行预处理去除云、云影和雪像素，利用每张影像的太阳方位角和天顶角与DEM数据计算山体阴影并去除，最终得到每个像元的有效观测次数(图2b)，从1990—2023年，有效观测少于200次的像素在所有像素中所占的比例非常小，表明有足够的高质量Landsat观测数据来支持区域内地表水动态的年际分析。1990—2023年每个像元的有效观测次数在新疆地区的空间分布见图2c。

1.2.2 其他数据 选取1990—2023年TerraClimate数据集中的降水量、气温、潜在蒸散发和雪水当量数据来反映气候变化对地表水体的影响。TerraClimate使用气候辅助插值，将WorldClim数据集中的高空间分辨率气候常态与其他来源的较粗分辨率时变(即每月)数据相结合生成，空间分辨率为1/24°(约4 km)，广泛应用于全球范围内的生态和水文研究[20]。

选取人口密度和耕地面积来反映人类活动对地表水体的影响。人口密度数据来自全球人类住区人口数据集(GHS-POP)，该数据集代表每个网格单元的人口数量，空间分辨率为100 m(https://www.worldpop.org/)。耕地面积来自中国土地覆盖数据集(CLCD)[21]，该数据集由武汉大学发布(https://zenodo.org/records/12779975)，空间分辨率为30 m。

GRACE重力卫星数据能够监测陆地水储量变化(TWS)，与水体面积进行比较[22]。采用德克萨斯大学空间研究中心(CSR，http://www2.csr.utexas.edu/grace)提供的从2003—2022年每月RL06_mascons数据集，数据空间分辨率为0.25°×0.25°。研究缺失的数据由缺失月份的多年累积平均和相邻月份的平均值对缺值月份进行填补。

数字高程模型(DEM)源于美国国家航空航天局(NASA)发布的航天飞机雷达地形测绘数据NASA DEM(https://search.earthdata.nasa.gov/search)，空间分辨率为30 m，主要用于生成坡度数据，辅助消除山体阴影的影响。

1.3 研究方法

1.3.1 水体提取 本文采用混合指数方法提取水体，利用遥感影像计算研究区域的归一化植被指数(NDVI)、归一化差异水体指数(mNDWI)和增强植被指数(EVI)，利用(mNDWI>EVI或mNDWI>NDVI)和(EVI<0.1)规则[23]提取水体，这一规则已被广泛使用在水体提取中[24-25]，计算公式如下所示：

$$\mathrm{mNDWI}=\frac{Green-SWIR}{Green+SWIR} \tag{1}$$

$$\mathrm{NDVI}=\frac{NIR-Red}{NIR+Red} \tag{2}$$

$$\mathrm{EVI}=2.5\times\frac{NIR-Red}{NIR+6\times Red-7.5\times Blue+1} \tag{3}$$

式中：*Blue*、*Green*、*Red*、*NIR*、*SWIR*分别为蓝光、绿光、红光、近红外和短波红外波段。

使用mNDWI>EVI或mNDWI>NDVI规则可以将水信号强于植被信号的像素归为水体，采用EVI<0.1可以进一步去除水与植被混合像素，因此，只有

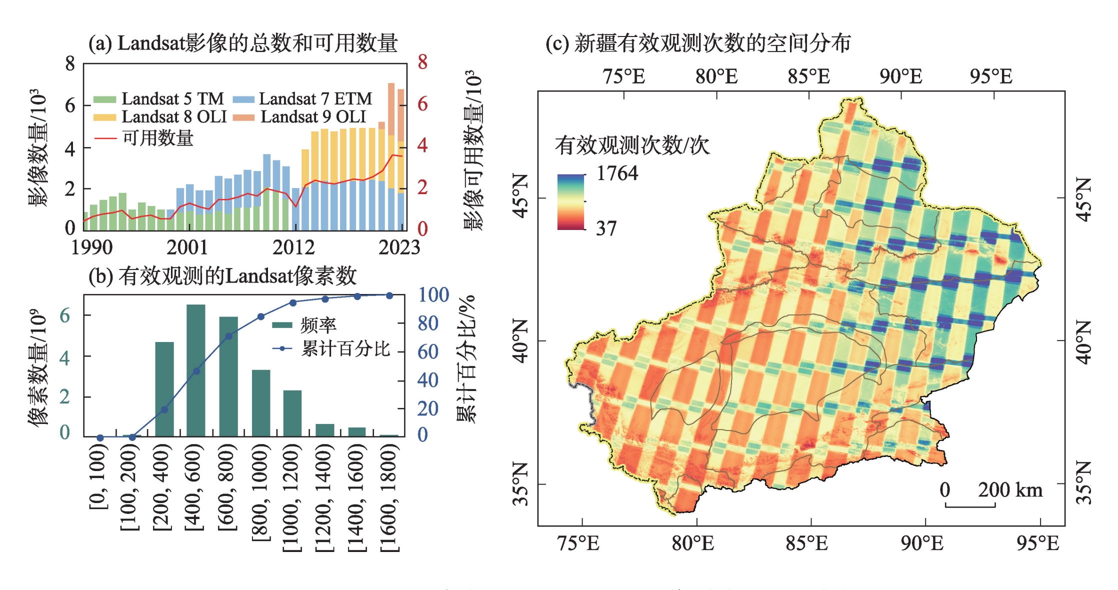


图2 1990—2023年新疆地区Landsat影像覆盖的时空分布

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of Landsat image coverage in Xinjiang from 1990 to 2023

满足这一规则的像素被划分为水体，其余像素被划分为非水体。随后利用NASA DEM生成坡度数据，并将研究区内坡度≥10°的像素定义为山体阴影，进一步排除其他非水体因素对提取精度的影响[26]。最后计算每幅影像水体出现的频率以区分季节性和永久性水体，水体频率（Water Frequency，*WF*）是在一段时间内，该像素观测为水体的次数占总有效观测次数的比例，计算公式如下所示：

$$WF = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} w \tag{4}$$

式中：N为一年内的有效观测次数；w为该像元类型的二值变量，水体为1，非水体为0。此外，$WF<0.25$的像素被排除，以减少影像处理中的潜在错误[27]。根据已有的研究[28-29]，当像素的$WF \geq 0.25$时，该像素被归类为有效水体，将每年的有效水体进一步分为季节性水体（$0.75>WF\geq 0.25$）和永久性水体（$1>WF\geq 0.75$）。

为了评估地表水体提取的准确性，使用混淆矩阵来衡量遥感识别的准确性，这一方法被广泛使用[30]。将2020年的高分辨率Sentinel-2A影像作为样本，在研究区内进行抽样，随机生成8000个测试样本，其中水样1145个，非水样6855个。最后，以Sentinel-2A解译影像的水信息为标准，比较Landsat影像中8000个样本的像元是否与之一致。建立的混淆矩阵结果表明（表1），总体精度和Kappa系数分别为98.57%和94.18%，表明本研究基于Landsat影像提取的水体信息具有较高的精度，可用于进一步的研究。

表1 本研究准确性评估的混淆矩阵

Tab. 1 The confusion matrix for accuracy assessment of this study

Sentinel-2A目视解译结果	提取结果		总计/个	用户精度
	水体/个	非水体/个		
水体	1098	47	1145	95.90%
非水体	68	6787	6855	99.01%
总计	1166	6834	8000	总体精度=98.57%
生产者精度	94.17%	99.31%		Kappa系数=94.18%

1.3.2 *趋势分析方法* 本文采用Theil-Sen趋势分析和Mann-Kendall检验法。Theil-Sen趋势分析法是一种非参数统计趋势分析方法，具有样本不需要服从特定的分布，且不受序列中空值和异常值干扰的优点，有较好的抗噪性，可以对变化趋势进行计算[31]。计算公式如下：

$$Slope = \mathrm{median}\frac{X_j - X_i}{j-i} \quad (1<i<j<n) \tag{5}$$

式中：n为研究年数；X_i、X_j为第i、j年的值；*Slope*为趋势度，当$Slope<0$时，表示值随时间呈下降趋势，当$Slope>0$时，表示值随时间呈上升趋势。

Mann-Kendall检验法是一种非参数检验方法，可以判断数据变化趋势的显著性[32-33]。计算公式如下所示：

$$S = \sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} \mathrm{sign}\left(X_j - X_i\right) \tag{6}$$

$$\mathrm{sign}\left(X_j - X_i\right) = \begin{cases} +1, & X_j - X_i > 0 \\ 0, & X_j - X_i = 0 \\ -1, & X_j - X_i < 0 \end{cases} \tag{7}$$

式中：sign()为符号函数，n、X_i和X_j同上，n为时间序列个数，S是时间序列中构建的检验统计量。一般统计量S在$n\geq 10$时服从标准正态分布（均值为0），方差计算公式如下所示：

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum t_i(i)(i-1)(2i+5)}{18} \tag{8}$$

由此标准化后的检验统计量Mann-Kendall统计量（Z）为：

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sigma}, & S>0 \\ 0, & S=0 \\ \dfrac{S+1}{\sigma}, & S<0 \end{cases} \tag{9}$$

式中：Z为检验统计值，Z的绝对值$|Z|\geq 1.96$时，表示通过P=0.05的显著性水平检验。

1.3.3 *地理探测器* 地理探测器是一种能够定量揭示地理环境因子与因子间交互作用及其对地理现象解释力的空间统计方法[34]。本研究使用因子探测器来量化气候变化和人类活动对新疆地表水体的影响。计算公式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \tag{10}$$

式中：q为驱动因素解释力，值域为[0，1]，q=0表示随机分布，q值越大，表明驱动因素的解释力越强；h=1，2，…，L为变量（地表水体面积）或因子（气候变化或人类活动因子）的分层，即分类或分区；N_h和N分别为第h层和全区的单元数；σ_h^2和σ^2分别是第h层和全区的方差值。*SSW*、*SST*分别为层内方差之和、

全区方差之和。

2 结果与分析

2.1 新疆地表水体空间分布特征

本文计算了新疆地区1990—2023年逐年和多年的WF，1990—2023年新疆地区的WF在空间上存在较大差异(图3)，有3.88×10⁸个像素的WF大于0，永久性水体面积约为8933.88 km²，季节性水体面积约为3129.94 km²。新疆的地表水体WF较高的区域以大型的湖泊、水库为主，WF较低的区域分布主要位于人类活动频繁的绿洲区域。地表水体主要分布在经度的80°E、87°E、纬度的37°N、39°N~40°N。

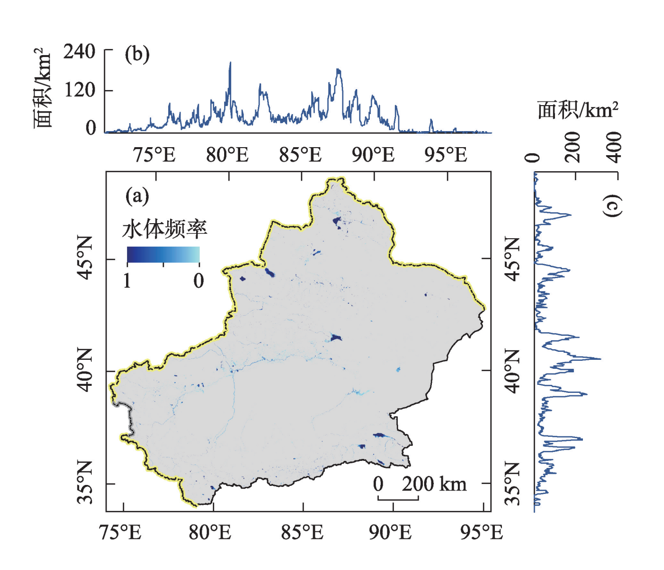


图3 1990—2023年新疆地区(a)水体频率空间分布、沿(b)经度、(c)纬度的地表水体总面积

Fig. 3 Spatial distribution of (a) water body frequency and total surface water area along (b) longitude and (c) latitude in Xinjiang from 1990 to 2023

新疆地区地表水体面积分布不均，水体占比存在较大的差异，永久性水体比例较大的流域主要分布在研究区的北部以及羌塘高原内陆河，季节性水体面积则相反，羌塘高原内陆河永久性水体所占比例最高，占该流域地表水体的89.43%以上；塔里木河干流季节性水体所占比例最大，达到地表水体的59.34%(图4)。为了表征地表水体变化的稳定性，计算了各区域变异系数(C_v)和标准差(SD)来揭示SWA的空间分布特征，C_v代表变化量，SD代表变化幅度，塔里木盆地荒漠区永久性水体C_v最大，SD较小，说明该区域在过去的33 a里变化增量显著，且稳定增长；羌塘高原内陆河永久性水体C_v较小，SD最大，说明永久性水体增量幅度适中，但波动较大。古尔班通古特荒漠区季节性水体C_v最大，SD较小，表明面积变化稳步增长；塔里木河源流季节性水体C_v较小，SD最大，说明水体面积变化强烈，易受外来因素影响。

2.2 新疆地表水体时间变化趋势

1990—2023年新疆的永久性水体大于季节性水体，且总体呈现一致的上升趋势(图5)，值得注意的是，永久性水体呈现显著且稳定的上升趋势(P<0.05)，由6803.25 km²增加至9269.48 km²(比1990年增加了36.25%)；季节性水体呈现波动上升趋势，由1058.18 km²增加至2983.02 km²(比1990年增加了

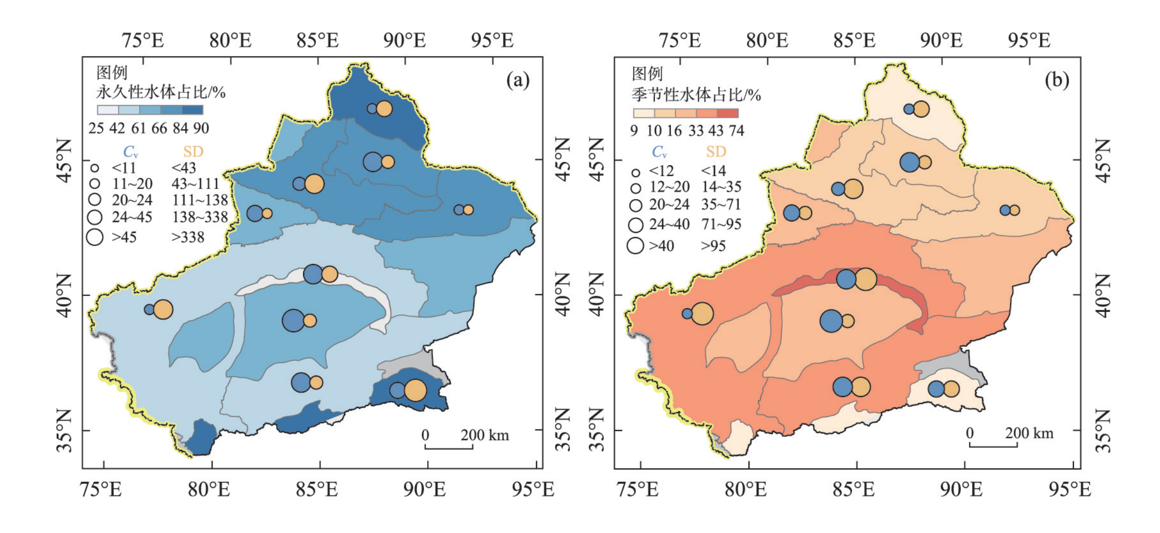
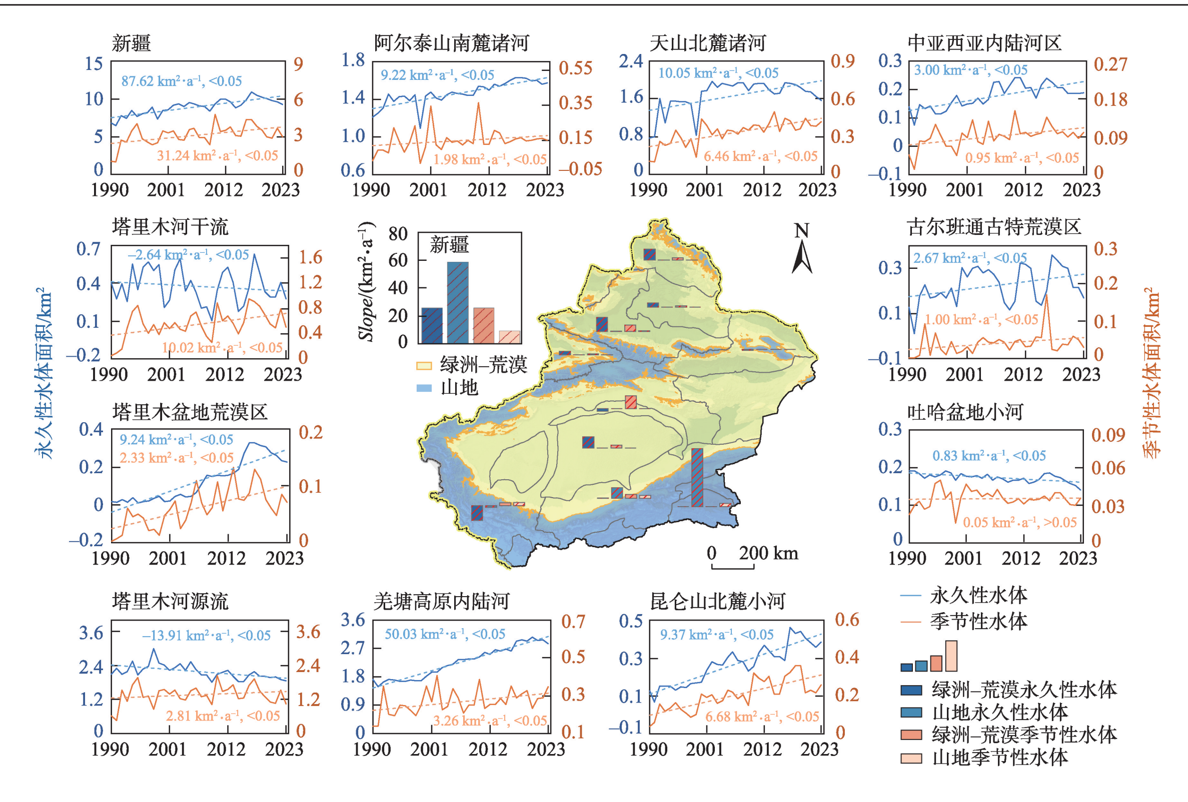


图4 1990—2023年新疆各流域的(a)永久性水体和(b)季节性水体的SD值和C_v值及在地表水体中所占比例

Fig. 4 SD and C_v values of (a) permanent and (b) seasonal water body in each river basin in Xinjiang from 1990 to 2023 and their proportions in surface water body



注：柱状图中红色斜线表示不同区域水体面积变化趋势显著（P<0.05）。

图5　流域及其山地、绿洲–荒漠地表水体面积变化趋势

Fig. 5 Change trends in surface water body of the river basin and its mountains, oasis-deserts

181.90%）。在整个研究期间，各区域地表水体的变化表现出明显的差异，塔里木河干流永久性水体呈波动变化，未呈现明显的减少趋势（P>0.05）；吐哈盆地小河和塔里木河源流呈显著减少的趋势（P<0.05）；其余区域均呈现显著增加的趋势，尤其是羌塘高原内陆河以50.03 km^2·a^{-1}的速度增长了1149.58 km^2（比1990年增加了67.24%），区域内阿亚库木湖、阿其克库木湖等较大湖泊的面积激增，尤其是阿亚库木湖的水面积持续增加，超过博斯腾湖成为新疆第一大湖泊[35]。除吐哈盆地小河和塔里木河源流外，各流域季节性水体总体呈现显著增长趋势，塔里木河干流增长速度最快，以10.02 km^2·a^{-1}的速度显著增加。

新疆的山地水体和绿洲–荒漠水体均呈现显著上升的趋势（图5），永久性水体中山地水体占据主导地位，以58.56 km^2·a^{-1}的速度显著增加，其中，羌塘高原内陆河增长速度最快，因其整个流域都位于山区主导了这一趋势；季节性水体由绿洲–荒漠水体控制（25.63 km^2·a^{-1}），由塔里木河干流主导。不同流域山地和绿洲–荒漠永久性水体和季节性水体的变化趋势存在明显差异，大部分流域变化趋势相似，均呈上升趋势，而塔里木河源流变化趋势与其他子流域不同，绿洲–荒漠永久性水体以13.31 km^2·a^{-1}（P<0.05）的速度显著下降，绿洲–荒漠季节性水体则缓慢增加（2.70 km^2·a^{-1}，P>0.05）。

2.3　地表水体驱动因素的定量评估

为了进一步研究气候因子和人类活动对水体变化的影响，利用地理探测器对气温（Tem）、降水（Pre）、潜在蒸散发（Pet）、雪水当量（SWE）、耕地面积（Crop）以及人口密度（Pop）等因子对永久性水体变化的影响程度进行了定量分析，如图6所示。不同流域的水体变化受影响因素的作用存在显著差异，气候因子中，雪水当量对水体的影响最为显著，平均贡献率为41.53%，其次是降雨，平均贡献率为30.98%；气温和潜在蒸散发对水体的影响较低，平均贡献率为28.31%、24.36%。人类活动对流域水体的影响差异较大，人口密度和耕地面积的平均贡献率分别为43.01%、34.94%。

不同类型水体驱动因素的贡献率存在显著差异（图7）。绿洲–荒漠水体的变化受到环境和社会因素的共同影响，其中，Pop对水体的影响最为显著，平均贡献率为64.10%，其次是Crop，平均贡献率

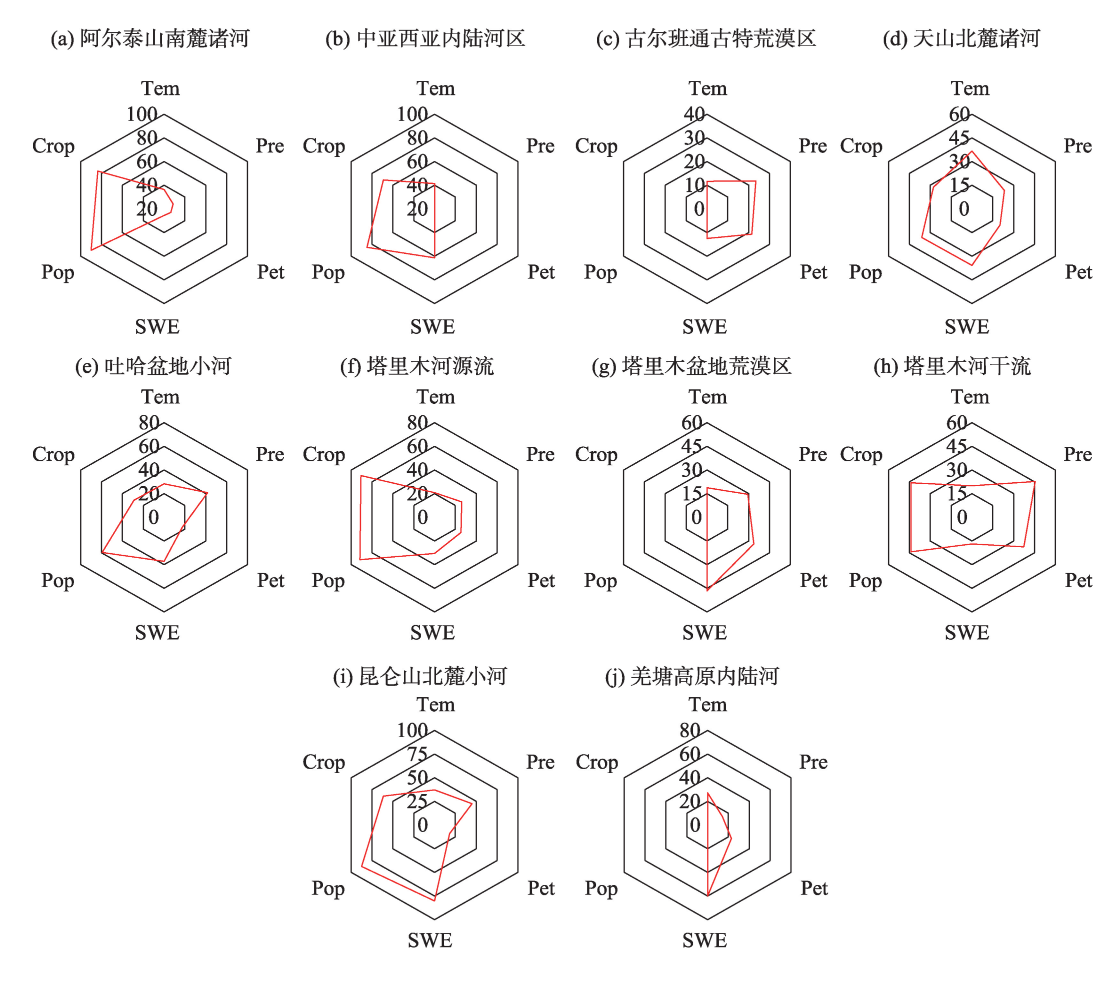


图6 各流域影响因素贡献率(%)

Fig. 6 Contribution rate of influencing factors in each watershed

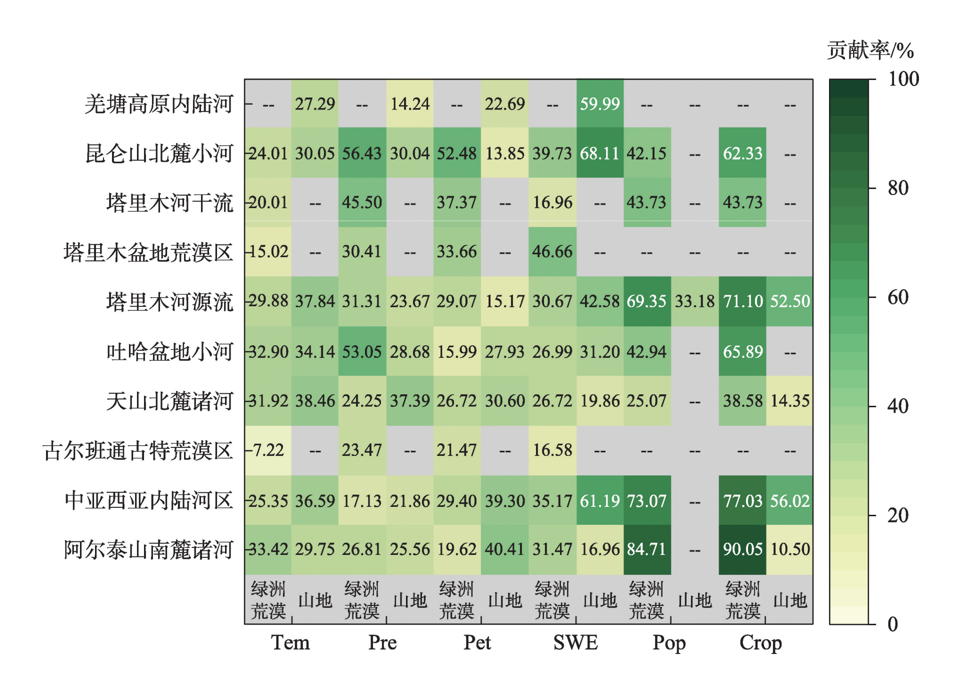


图7 各流域山地水体及绿洲-荒漠水体影响因素贡献率

Fig. 7 Contribution rates of influencing factors for mountain and oasis-desert water body in each river basin

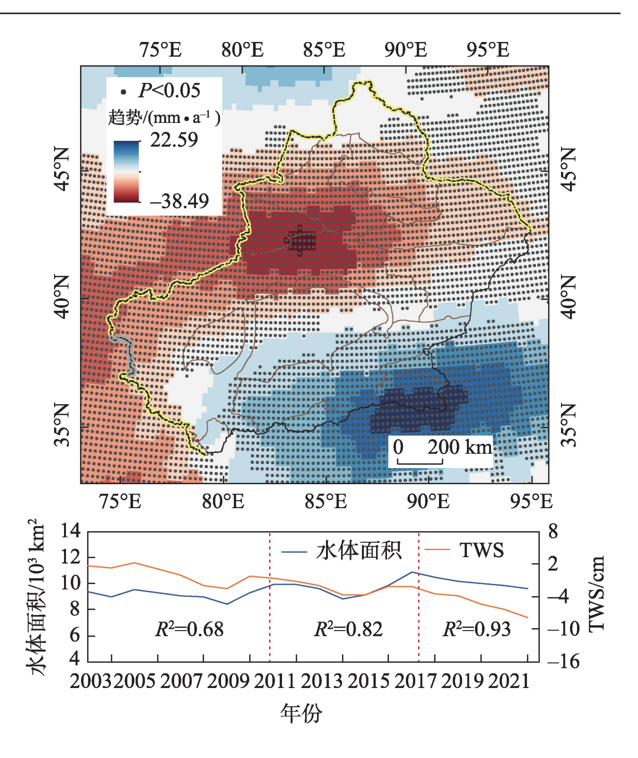
为54.43%,Pre、SWE、Pet和Tem,平均贡献率分别为34.26%、30.11%、29.53%和24.42%。这说明绿洲-荒漠水体的变化主要受人类活动的影响。气候变化主要控制山地水体的变化,尤其是SWE的影响最大,平均贡献率为42.84%,其次是Tem,平均贡献率为33.45%。值得注意的是,在部分流域,尤其是中亚西亚内陆河区和塔里木河源流地区,人类活动对山地水体的影响同样不容忽视,其中Pop的贡献率达到了56.02%和52.50%,表明人类活动在这些区域的显著作用。

3 讨论

3.1 地表水体动态变化对陆地水储量的影响

区域水资源由湖泊、河流、地下水和冰川等组成,对维持社会生态系统多样性具有重要作用,地表水体作为区域水资源的关键组成部分,其动态变化对整个区域水资源的稳定与可持续性具有深远的影响[36]。利用GRACE数据作为新疆地区水资源指标,采用分段相关系数来定量描述水体面积与TWS的相关性,分析地表水动态变化的水文意义。

2003—2022年新疆陆地水储量的变化呈现出显著的空间差异性,天山山脉中部陆地水储量以最大38.49 mm·a^{-1}的速度呈现出显著的下降趋势,主要是由于其冰川的迅速融化以及农业用水的加剧;而在东南部山区由于降雨量增多和冰川融水补给增加的共同作用,陆地水储量以22.59 mm·a^{-1}的速度表现出显著上升的趋势(图8)。整体上,新疆陆地水储量以4.15 mm·a^{-1}的速度呈下降趋势,而地表水体呈现出相反的变化,以57.01 km^2·a^{-1}的速度呈上升趋势。两者整体上表现出不相关,但在不同时间段两者的变化趋势非常相似,在2011年、2017年新疆的陆地水储量与地表水体的相关系数发生突变,在2011年之前两者的相关系数低至0.68,这是由于降雨的增加,使得水体面积保持一个相对平稳的趋势,而陆地水储量呈现下降趋势。在2011—2017年、2017—2022年的相关性系数高达0.82、0.93,表明地表水体的动态变化对陆地水储量的影响越来越大。分析陆地水储量与地表水体之间的关系有助于了解新疆地区复杂的水资源变化格局,为水资源管理和区域可持续发展提供重要的科学依据。



注:图中黑点表示陆地水储量变化趋势在统计上显著($P<0.05$)。

图8 新疆陆地水储量变化(TWS)趋势及与地表水体的对比

Fig. 8 Change trend of terrestrial water reserves in Xinjiang and comparison with surface water bodies

3.2 地表水体动态变化归因分析

新疆地表水体从1990—2023年显著增加了5451.17 km^2,这与全球其他许多干旱和半干旱地区地表水体的普遍下降形成鲜明对比。研究表明,在过去33 a中,气候变化和人类社会活动对地表水体构成了威胁,导致全球超过53%的湖泊蓄水量呈下降趋势[37]。而新疆之所以出现这种现象,主要是因其是一个典型的山地-绿洲-荒漠生态系统,水资源主要依赖于降水和高山冰雪融水的输送[38]。近年来,由于气候变化的影响,新疆气温快速上升,平均上升幅度为0.33~0.39 ℃·a^{-1},远超过中国乃至全球的平均水平,导致冰川、积雪和永久冻土的融化[39],从而共同促进了地表水体面积的扩大。此外,降水以9.95 mm·(10a)$^{-1}$的速率增加[5],直接补充了山区开阔的地表水体。因此,气候变化是驱动新疆地表水体变化的主要因素,尤其是在羌塘高原内陆河,山地水体面积显著增加。

地表水体同样会受到社会活动的显著影响,尤其在农业活动密集的绿洲-荒漠地区,由于这些地区降水量稀少,其水源主要依赖于山区径流。绿洲区域通常是人口密集的地区,拥有众多的城镇和耕地,人类活动在这里尤为显著,包括农业灌溉、家庭

用水和水资源管理等[40-41]，都在不同程度上影响着地表水体的变化。过去几十年中，新疆耕地面积经历了显著增长，2022年耕地面积达到了123569.79 km²，较1990年增长了61.68%，这种耕地面积的扩张直接增加了对水资源的需求，进而影响了地表水体的分布[42-43]。为了满足生活和生产的用水需求，新疆建立了大量的供水设施[44]，到2022年，新疆水库的总库容达到了24.12 km³，相比1990年的5.96 km³增长了近三倍。此外，2000年以来实施的"生态输水工程"，使塔里木河下游地下水位抬升了1.38~2.69 m[45]，显著改变了地表水资源的分布和利用状况。综上所述，人类活动不仅可以改变地表水体的状态，还可以控制其变化的趋势，因此，采取更加科学和可持续的水资源管理策略，以确保生态平衡和社会经济的持续发展尤为重要。

3.3 不确定性分析与未来展望

本研究利用多源遥感数据分析了1990—2023年新疆水体面积的长期动态变化及其空间分异特征，研究过程面临以下几项不确定性。首先，虽然使用CFmask波段可以有效减少云、云影和雪像素等对数据的影响，但薄云和山体阴影等问题仍可能存在，这可能会影响地表水体提取的准确性。其次，Landsat卫星的16 d重访周期可能会错过瞬时的地表水变化，例如洪水和暴雨等事件[46]。最后，尽管Landsat数据的空间分辨率达到了30 m，但这仍然限制了对小型地表水体的细致分析以及水陆边界的精确变化。因此，在今后的地表水体研究中，需采用不受天气或时间限制的雷达数据，以及更高空间分辨率的光学数据，以提高地表水体的提取效果。

4 结 论

本研究基于GEE平台，使用多源遥感数据对1990—2023年新疆地表水体进行逐年监测，分析了地表水体的空间格局与变化趋势，揭示气候变化和人类活动对水体面积变化的影响。主要结论如下：

（1）过去三十多年里新疆的地表水体呈现显著上升趋势，对陆地水储量的影响越来越大，永久性水体增加了2466.20 km²（比1990年增加了36.25%），季节性水体增加了1924.84 km²（比1990年增加了181.90%）。

（2）新疆永久性水体主要由山地水体控制，如羌塘高原内陆河显著扩张了1149.58 km²（比1990年增加了67.24%），而季节性水体以绿洲-荒漠水体为主，如塔里木河干流增加了344.92 km²（比1990年增加了218.15%）。

（3）水体变化受气候因子和人类活动的共同影响，气候因子对山地水体平均贡献率最高的为雪水当量（42.84%），人类活动特别是人口密度和耕地的变化，在塑造绿洲-荒漠水体中起着关键作用，平均贡献率分别为64.10%、54.43%。

参考文献（References）：

[1] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. Nature, 2016, 540(7633): 418-422.

[2] Hall J W, Grey D, Garrick D, et al. Coping with the curse of freshwater variability[J]. Science, 2014, 346(6208): 429-430.

[3] Vörösmarty C J, McIntyre P B, Gessner M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. Nature, 2010, 467(7315): 555-561.

[4] 姚俊强. 新疆空中水资源和地表水资源变化特征研究[J]. 干旱区研究, 2024, 41(2): 181-190. [Yao Junqiang. Change in atmospheric and surface water resource in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(2): 181-190.]

[5] Yao J, Chen Y, Guan X, et al. Recent climate and hydrological changes in a mountain-basin system in Xinjiang, China[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 226: 103957.

[6] Shen Y J, Shen Y, Guo Y, et al. Review of historical and projected future climatic and hydrological changes in mountainous semiarid Xinjiang (northwestern China), Central Asia[J]. CATENA, 2020, 187: 104343.

[7] Lu H, Zhao R, Zhao L, et al. A contrarian growth: The spatiotemporal dynamics of open-surface water bodies on the northern slope of Kunlun Mountains[J]. Ecological Indicators, 2023, 157: 111249.

[8] Zheng L, Xia Z, Xu J, et al. Exploring annual lake dynamics in Xinjiang (China): Spatiotemporal features and driving climate factors from 2000 to 2019[J]. Climatic Change, 2021, 166(3): 36.

[9] 邹珊, 吉力力·阿不都外力, 黄文静, 等. 塔里木河下游生态输水对地表水体面积变化的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 681-690. [Zou Shan, Jilili Abuduwaili, Huang Wenjing, et al. Effects of ecological water conveyance on changes of surface water area in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 681-690.]

[10] Alsdorf D E, Rodríguez E, Lettenmaier D P. Measuring surface water from space[J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45(2): 1-24.

[11] Liu X, Hu G, Chen Y, et al. High-resolution multi-temporal mapping of global urban land using Landsat images based on the Google Earth Engine Platform[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 227-239.

[12] Wang X, Xiao X, Zou Z, et al. Gainers and losers of surface and terrestrial water resources in China during 1989-2016[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3471.

[13] Huang C, Chen Y, Zhang S, et al. Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review[J]. Reviews of Geophysics, 2018, 56(2): 333-360.

[14] McFeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.

[15] Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14): 3025-3033.

[16] Sun F, Sun W, Chen J, et al. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(21): 6854-6875.

[17] Gómez C, White J C, Wulder M A. Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 116: 55-72.

[18] Khatami R, Mountrakis G, Stehman S V. A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 177: 89-100.

[19] Chen Y, Li Z, Fan Y, et al. Progress and prospects of climate change impacts on hydrology in the arid region of Northwest China [J]. Environmental Research, 2015, 139: 11-19.

[20] Abatzoglou J T, Dobrowski S Z, Parks S A, et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015[J]. Scientific Data, 2018, 5(1): 170191.

[21] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[22] Tapley B D, Bettadpur S, Ries J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the earth system[J]. Science, 2004, 305(5683): 503-505.

[23] Zou Z, Xiao X, Dong J, et al. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115 (15): 3810-3815.

[24] Huang W, Duan W, Nover D, et al. An integrated assessment of surface water dynamics in the Irtysh River Basin during 1990-2019 and exploratory factor analyses[J]. Journal of Hydrology, 2021, 593: 125905.

[25] Huang W, Duan W, Chen Y. Unravelling lake water storage change in Central Asia: Rapid decrease in tail-end lakes and increasing risks to water supply[J]. Journal of Hydrology, 2022, 614: 128546.

[26] Zhou H, Liu S, Hu S, et al. Retrieving dynamics of the surface water extent in the upper reach of Yellow River[J]. Science of The Total Environment, 2021, 800: 149348.

[27] Zou Z, Dong J, Menarguez M A, et al. Continued decrease of open surface water body area in Oklahoma during 1984-2015[J]. Science of The Total Environment, 2017, 595: 451-460.

[28] Chen J, Kang T, Yang S, et al. Open-Surface water bodies dynamics analysis in the Tarim River Basin (North-Western China), based on Google Earth Engine cloud platform[J]. Water, 2020, 12(10): 2822.

[29] 李崇巍, 王志慧, 汤秋鸿, 等. 1986—2019年黄河流域地表水体动态变化及其影响因素[J]. 地理学报, 2022, 77(5): 1153-1168. [Li Chongwei, Wang Zhihui, Tang Qiuhong, et al. Dynamics of surface water area in the Yellow River Basin and its influencing mechanism during 1986-2019 based on Google Earth Engine[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(5): 1153-1168.]

[30] Olofsson P, Foody G M, Herold M, et al. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 148: 42-57.

[31] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63 (324): 1379-1389.

[32] Hamed K H, Ramachandra Rao A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of Hydrology, 1998, 204(1): 182-196.

[33] Mann H B. Nonparametric Tests Against Trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.

[34] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[35] 李稚, 朱成刚, 汪家友, 等. 东昆仑库木库里盆地典型湖泊水量蒸发损失估算[J]. 干旱区地理, 2024, 47(8): 1263-1276. [Li Zhi, Zhu Chenggang, Wang Jiayou, et al. Estimation of evaporation loss from typical lakes in the Kumukuli Basin, East Kunlun Mountains [J]. Arid Land Geography, 2024, 47(8): 1263-1276.]

[36] Tao S, Zhang H, Feng Y, et al. Changes in China's water resources in the early 21st century[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2020, 18(4): 188-193.

[37] Yao F, Livneh B, Rajagopalan B, et al. Satellites reveal widespread decline in global lake water storage[J]. Science, 2023, 380 (6646): 743-749.

[38] Yao J, Chen Y, Zhao Y, et al. Climatic and associated atmospheric water cycle changes over the Xinjiang, China[J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124823.

[39] Chen Y, Li B, Fan Y, et al. Hydrological and water cycle processes of inland river basins in the arid region of Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(2): 161-179.

[40] 蔺静, 赵成义, 马晓飞, 等. 基于生态系统服务价值的塔里木河干流土地利用结构优化[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1140-1151. [Lin Jing, Zhao Chengyi, Ma Xiaofei, et al. Optimization of land use

structure based on ecosystem service value in the mainstream of Tarim river[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1140−1151.]

[41] 陈亚宁, 陈亚鹏, 朱成刚, 等. 西北干旱荒漠区生态系统可持续管理理念与模式[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7410−7417. [Chen Yaning, Chen Yapeng, Zhu Chenggang, et al. The concept and mode of ecosystem sustainable management in arid desert are as in Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7410−7417.]

[42] Geng Q, Zhao Y, Sun S, et al. Spatio-temporal changes and its driving forces of irrigation water requirements for cotton in Xinjiang, China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 280: 108218.

[43] Chen P, Wang S, Liu Y, et al. Water availability in China's oases decreased between 1987 and 2017[J]. Earth's Future, 2023, 11 (4): e2022EF003340.

[44] Xia Q Q, Chen Y N, Zhang X Q, et al. Identifying reservoirs and estimating evaporation losses in a large arid inland basin in Northwestern China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(5): 1105.

[45] 陈永金, 艾克热木·阿布拉, 张天举, 等. 塔里木河下游生态输水对地下水埋深变化的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 651−658. [Chen Yongjin, Aikeremu Abula, Zhang Tianju, et al. Effects of ecological water conveyance on groundwater depth in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 651−658.]

[46] Wu Q, Lane C R, Li X, et al. Integrating LiDAR data and multi-temporal aerial imagery to map wetland inundation dynamics using Google Earth Engine[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 228: 1−13.

Dynamic changes and driving factors of surface water body in Xinjiang from 1990 to 2023

ZOU Bin[1,2], ZOU Shan[2,3,4], YANG Yuhui[1]

(1. College of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Akesu National Station of Observation and Research for Oasis Agro-ecosystem, Akesu 843017, Xinjiang, China)

Abstract: Xinjiang features a unique mountain-oasis-desert ecological system, in which the surface water body plays a crucial role in maintaining the ecological balance and supporting regional socioeconomic development. This study used Landsat 5, 7, 8, and 9 satellite remote sensing images and a mixed index algorithm to estimate Xinjiang's surface water area from 1990 to 2023 for analysis of its spatial patterns and changes over time. Geographic detector methods were used to identify the factors influencing changes in the surface water area. The findings revealed that between 1990 and 2023, the area of the permanent water body in Xinjiang increased by 36.25% (2466.20 km^2), driven primarily by the mountain water body. Notably, the inland river basins of the Qiangtang Plateau expanded significantly by approximately two-thirds (1149.58 km^2). The seasonal water bodies, mainly consisting of the oasis-desert water body, also rose by 181.90% (1924.84 km^2), with the mainstream Tarim River nearly doubling in area (344.92 km^2). Changes in mountain water bodies were largely influenced by climatic factors, with the snow water equivalent contributing the highest average rate (42.84%). In contrast, human activities had a more substantial impact on the oasis-desert water body, with population density and cultivated land exhibiting average contribution rates of 64.10% and 54.43%, respectively. This study provides a comprehensive analysis of the temporal and spatial changes in Xinjiang's surface water body and their driving factors, thereby offering critical scientific insights for assessing water resource development potential and formulating effective water resource management strategies in the region.

Keywords: surface water body; Landsat; mountain-oasis-desert; climate change; Xinjiang